

## 중속 접속된 전압제한형 서지방호장치의 에너지협조

(Energy Coordination of Cascaded Voltage Limiting Type Surge Protective Devices)

이복희\* · 신희경

(Bok-Hee Lee · Hee-Kyung Shin)

### Abstract

For the purpose of designing and applying optimum surge protection, one of the essential points is to take into account the energy coordination between cascaded surge protective devices (SPDs) and it is important to obtain an acceptable sharing of the energy stress between two cascaded SPDs. In this paper, in case of two voltage-limiting SPDs connected in parallel, the amount of splitting impulse current and energy that flow through each SPDs is investigated as a function of the protective distance. As a result, the energetic coordination between cascaded SPDs is strongly dependent on the voltage protection level of SPDs and the protective distance. It was confirmed that the sharing of the energy between two cascaded SPDs and the limited voltage levels are appropriate when the voltage protection levels of both upstream and downstream SPDs are the same.

Key Words : Surge Protection, Energy Coordination, Voltage-Limiting SPD, Protective Distance, Voltage Protection Level

### 1. 서 론

최근 초고속 반도체 소자 기술의 발전으로 정보통신 시스템의 보급이 급격히 증가하였다. 이러한 정보통신 시스템에 적용되는 전자기기는 내전압이 매우 낮으므로 낙뢰 및 개폐작용에 의한 서지전압에 의해 파손되거나 오동작을 일으킬 수 있다. 또한 교류 전원선과

더불어 각종 신호선 및 통신선이 네트워크화되어 있어 다양한 경로를 통해 입사하는 서지로 인해 피해가 증가하고 있다. 다양한 경로를 통해 입사하는 서지에 대해 전자기기를 효과적으로 보호하기 위해 KS표준, 전기설비기술기준 및 판단기준에서는 서지방호장치 (surge protective devices; SPDs)를 적절하게 설치하도록 하고 규정하고 있다[1,2]. 하지만 SPD의 설치방법이 적절하지 못하거나 보호협조가 제대로 이루어지지 않으면 SPD가 파손되거나 보호대상의 전자기기가 손상될 수 있다[3].

따라서 뇌서지 및 이상전압으로부터 전자기기를 효과적으로 보호하기 위해서 SPD 상호간의 에너지협조가 적절히 이루어져야 하며, SPD의 전압보호레벨이

\* 주(교신)저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수  
\* Main(corresponding) author : School of Electrical Engineering, Inha University, Professor  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2012년 10월 16일  
1차심사 : 2012년 10월 23일  
심사완료 : 2012년 12월 20일

보호대상 전자기기의 임펄스내전압 이내로 제한되어야 한다[3]. SPD 상호간의 보호협조는 SPD의 전압보호레벨, 공칭방전전류, 설치방법, 설치위치와 밀접한 관련이 있다. 하지만 KS C IEC 61643-12[5]에서는 SPD의 선정과 설치에 대한 원론적인 내용만 기술되어 있으므로 현장의 실무에 활용될 수 있는 구체적인 기술적 사항에 대해서는 보다 면밀한 연구가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 중속 접속하는 SPD 상호간의 에너지협조를 고려한 전원용 SPD의 선정 및 설치위치의 결정에 필수적으로 고려해야 할 요소의 검증에 위한 목적으로 실증적 연구를 수행하였다. 조합형 임펄스전압 전류발생장치를 이용하여 전원용 SPD로 주로 사용되는 전압제한형 SPD에 너서지가 입사하였을 때 중속 접속된 SPD의 동작특성 및 상호거리에 따른 에너지분담을 실험적으로 분석하였다.

## 2. 관련이론

### 2.1 SPD 상호간 에너지분담

전압제한형 SPD의 에너지내량은 SPD의 최대방전전류 이하에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 거의 선형적인 특성을 가지며, 각 SPD의 특성에 따라 정해진다. SPD를 중속 접속하는 경우 분담하는 에너지가 적절한 에너지협조가 이루어지도록 SPD가 견딜 수 있

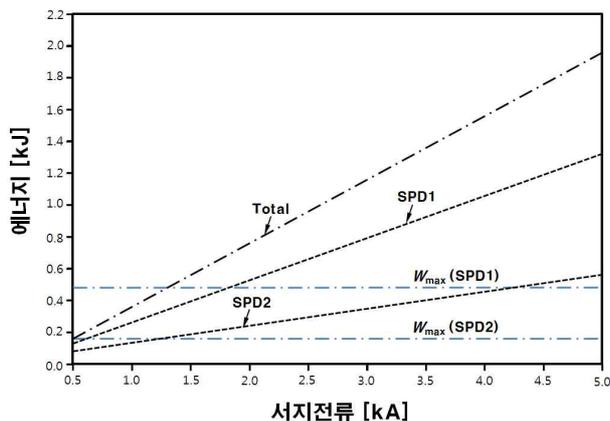


그림 1. SPD1과 SPD2 사이의 에너지협조의 원리  
Fig. 1. Principles of energy coordination between SPD 1 and SPD 2

는 에너지내량( $W_{max}$ )이내인 SPD의 서지내량 및 특성을 고려하여 선정해야 한다.

통상 상위 SPD의 에너지내량은 하위 SPD 에너지내량보다 큰 것을 사용한다. 입사된 서지에 대한 각 SPD의 에너지분담이 적절해야 하며, 각 SPD의 에너지분담은 주로 각 SPD의 제한전압과 보호거리에 의존한다.

### 2.2 SPD의 전압보호레벨의 선정

SPD를 중속으로 접속할 때 상위와 하위 SPD의 에너지협조는 각각 적절한 전압보호레벨을 가지는 SPD의 조합으로 이루어진다. 하위 SPD에 의해서 제한된 서지전압이 전자기기가 견딜 수 있는 임펄스내전압( $U_w$ ) 이내가 되도록 조합해야 한다. 이러한 전압보호레벨의 협조가 필요한 이유는 전자기기와 같이 임펄스내 전압이 매우 낮은 기기의 경우 SPD의 중속 접속으로 보호대상기기에 도달하는 서지전압을 최대한 낮게 하기 위해서이다. 따라서 각 SPD에 입사되는 전압이 SPD의 동작개시전압 이상이 되도록 하여 SPD가 적절하게 동작해야 하며, 하위 SPD의 전압보호레벨이 낮은 경우 상위 SPD의 단자전압은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[5].

$$U_1 = U_2 + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

여기서  $U_1$ 은 상위 SPD의 단자전압,  $U_2$ 는 하위 SPD의 단자전압,  $L$ 은 SPD간의 거리에 의하여 결정되는 선로의 인덕턴스이다.

상위 SPD의 전압보호레벨이 하위 SPD의 전압보호레벨보다 낮은 경우 전원 측에서 입사된 서지전압은 상위 SPD에 의해 먼저 제한되며, 제한된 서지전압은 하위 SPD를 향해 전파되어 왕복진동현상을 일으키며 이 전압이 하위 SPD에 입사된다. 또한 보호대상기기에 입사되는 전압은 하위 SPD에서 부하기기까지의 선로길이에 따른 진동현상으로 하위 SPD의 제한전압보다 높아질 수 있다[5]. 하위 SPD와 보호대상기기 사이의 거리도 중요하며, 하위 SPD와 보호대상기기의

보호거리가 길면, 서지전압의 왕복진동현상으로 하위 SPD의 제한전압이 낮음에도 불구하고 전자기기를 보호하지 못할 수도 있다.

### 3. 실험

실험대상 SPD로는 전원회로의 뇌서지에 대한 보호에 가장 많이 사용되고 있는 공칭방전전류( $I_n$ )가 20kA이며, 공칭방전전류에 대한 제한전압이 각각 1,240V, 710V인 전압제한형 SPD를 선정하였다. 종속 접속된 SPD 상호간의 거리는 일반 건축물에 설치하는 조건을 고려하여 1m, 10m, 100m로 하였다. 표 1에 나타난 실험조건 조합으로 2개의 SPD를 종속으로 설치하는 실험회로를 그림 2와 같이 구성하였다. 실험회로는 단면적 2.5mm<sup>2</sup>의 IV절연전선으로 배선하였으며, 서지시뮬레이터로는 IEEE C62.41[4] 서지시험에 요구되는 개방상대에서 1.2/50 $\mu$ s 임펄스전압, 단락상대에서 8/20 $\mu$ s 임펄스전류를 발생시키는 조합형 임펄스발생장치를 사용하였다.

표 1. 실험조건

Table 1. Experimental conditions

구분	종속 접속의 형태		보호거리 m
	SPD1	SPD2	
Case 1	SPDa	SPDb	1, 10, 100
Case 2	SPDb	SPDb	1, 10, 100
Case 3	SPDb	SPDa	1, 10, 100

공칭방전전류 20kA에 대한 SPD의 제한전압  
SPDa : 1,240V, SPDb : 710V

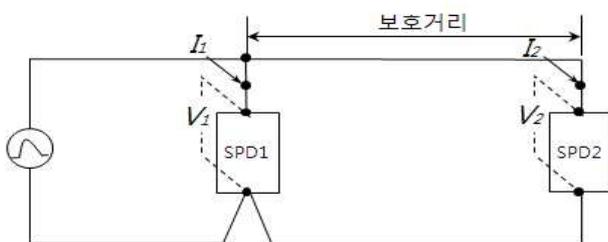


그림 2. SPD의 에너지협조를 평가하기 위한 실험회로  
Fig. 2. Experimental circuit for evaluating energy coordination of SPDs

전압의 측정에는 DC-50MHz 주파수대역의 능동형 차동전압프로브를 사용하였고, 대전류측정용으로는 16MHz의 주파수대역과 40kA까지 측정할 수 있는 전류프로브를 사용하였고, 소전류측정용으로는 20MHz의 주파수대역과 5kA까지 측정할 수 있는 관통형 전류프로브를 사용하였다. 서지전압을 상위 SPD1에 입사시켰을 때 각 SPD에 흐르는 임펄스전류와 SPD의 단자전압을 측정하였다. 임펄스전압과 전류 파형은 5GS/s의 오실로스코프로 관측하였으며, 오실로스코프의 연산기능을 이용하여 각 SPD가 분담하는 에너지를 산출하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 상위 SPD의 전압보호레벨이 높은 경우(Case 1)

상위에 SPDa, 하위에 SPDb를 종속 접속한 Case 1의 경우 각 SPD에 흐르는 임펄스전류와 단자전압 파형의 대표적인 예를 그림 3에 나타내었다.

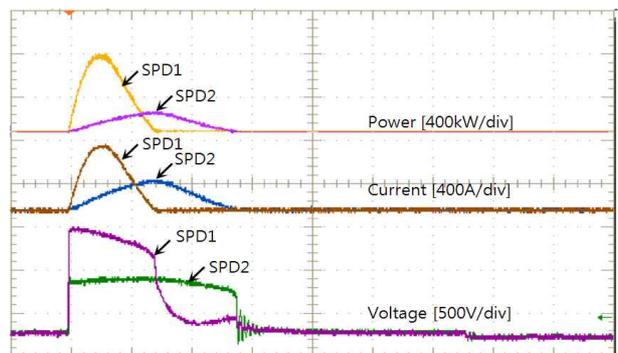


그림 3. SPD1의 전압보호레벨이 SPD2보다 높은 경우 1.2/50 $\mu$ s 임펄스전압에 대한 각 SPD의 단자전압과 전류 파형의 대표적인 예

Fig. 3. Examples of the terminal voltage and current waveforms of each SPDs against 1.2/50 $\mu$ s impulse voltage when the voltage protection level of SPD1 is higher than that of SPD2

그림 3의 최상부의 파형은 SPD에 흐르는 전류와 단자전압의 곱으로 표시된 순시전력의 파형이며, 에너지

는 이 파형의 시간에 대한 적분으로 오실로스코프의 연산기능으로 산출되고, 결과는 수치로 표시되므로 파형으로는 나타낼 수 없었다. 서지전압에 대한 상위 SPD1의 제한전압이 하위 SPD의 제한전압보다 높으므로 입사된 서지전압에 대하여 하위 SPD2가 먼저 동작하였으며, 식 (1)과 같은 전압으로 상위 SPD1이 동작한다. SPD2에 흐르는 전류는 SPD1의 동작이 중지될 때 최대로 된 이후 서서히 감소한다. SPD1의 도통기간은 SPD2의 약 1/2정도이며, SPD1의 단자전압은 SPD2의 단자전압에 상호거리에 대한 전압강하의 합으로 되어 나타난다. SPD1과 SPD2 사이의 거리 즉, 상호거리를 파라미터로 하여 입사되는 서지전류의 크기에 따른 각 SPD의 단자전압의 측정결과를 그림 4에 나타내었다.

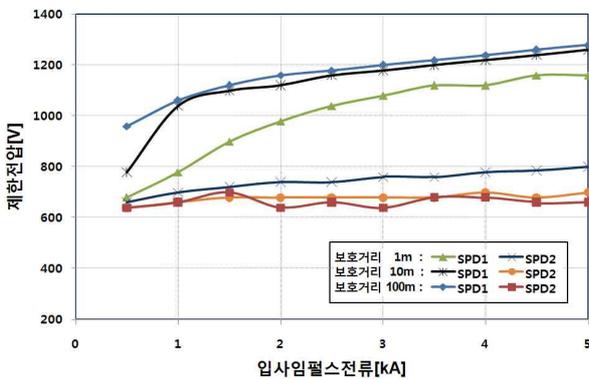


그림 4. Case 1에 대한 보호거리에 따른 각 SPD 단자전압의 측정값  
 Fig. 4. Measured results of the residual voltage of each SPDs as a function of protective distance for Case 1

그림 4에서 전압보호레벨이 높은 SPD1이 SPD2에 비하여 제한전압이 높으며, 보호거리가 증가함에 따라 SPD1의 제한전압이 높아지는 반면, SPD2의 제한전압이 낮아지는 경향을 보인다. 또한 보호거리의 증가에 따라 SPD1과 SPD2의 제한전압의 차가 크게 나타났다. 이는 동작개시전압이 낮은 SPD2가 먼저 동작하여 SPD2의 제한전압과 보호거리에 따른 선로전압강하의 합이 SPD1의 단자전압으로 나타기 때문이다.

개방상태에서  $1.2/50\mu s$  임펄스전압이며 단락상태에

서  $8/20\mu s$  임펄스전류를 공급하는 조합과임펄스가 SPD1의 앞단에서 입사하였을 때 각 SPD 양단에 나타나는 단자전압과 SPD에 흐르는 전류의 측정결과를 기반으로 산출한 각 SPD가 분담하는 에너지의 결과를 그림 5에 나타내었다.

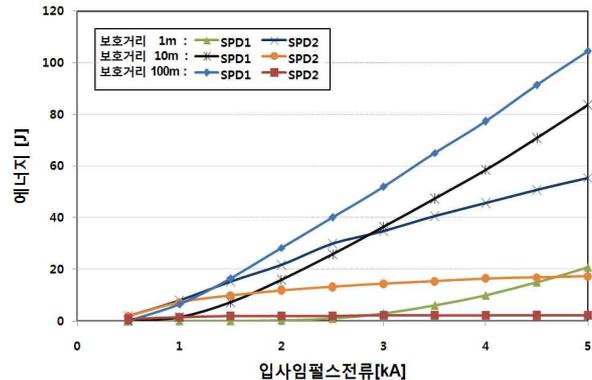


그림 5. Case 1에 대한 보호거리에 따른 각 SPD에 분담에너지의 산출결과  
 Fig. 5. Calculated results of the sharing energy of each SPDs as a function of the protective distance for Case 1

상호거리에 따른 각 SPD의 에너지분담의 의존성이 매우 크게 나타났으며, SPD의 단자전압에는 보호거리에 상응하는 인덕턴스에 의한 전압강하도 포함되어 있어 실험조건에 따라 입사임펄스전류에 대한 총합에너지는 다소 다르게 나타났다. 각 SPD의 에너지분담은 보호거리가 짧은 경우 상위 SPD1뿐 아니라 하위 SPD2도 에너지를 많이 분담하게 되며, 보호거리가 증가함에 따라 SPD2가 분담하는 에너지는 점점 감소하여 SPD1이 거의 모든 에너지를 분담한다. 이는 보호거리로 인한 전압강하에 의해 SPD1의 단자전압이 높아져 SPD1이 보다 많은 에너지를 분담하기 때문이다.

보호거리 1m일 때는 서지에 의해 입사된 에너지의 대부분을 SPD2가 분담하며, 보호거리 10m일 때는 서지전류가 약 1.5kA까지는 SPD2의 분담에너지가 크지만 서지전류의 증가에 따라 반전되는 양상을 나타내었다. 또한 보호거리가 100m일 때는 입사된 에너지의 대부분을 SPD1이 분담하는 것으로 나타났다. 즉 보호거리가 긴 경우 에너지분담이 적절하다고 볼 수 있

나 보호거리가 짧은 경우 에너지협조가 이루어지지 않는다. 특히 보호거리가 짧은 경우 Case 1의 조합은 매우 부적절하므로 적용하면 안 된다.

### 4.2 상위와 하위 SPD의 전압보호레벨이 동일한 경우(Case 2)

상위와 하위 SPD로 모두 SPD<sub>b</sub>를 종속 접속한 경우 (Case 2) 1.2/50 $\mu$ s 임펄스전압을 인가한 때 각 SPD에 흐르는 전류와 단자전압 파형의 대표적인 예를 그림 6에 나타내었다.

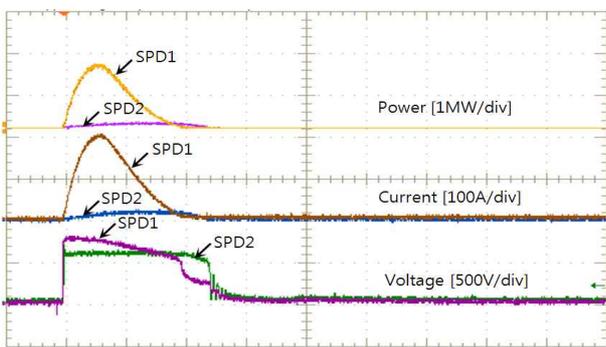


그림 6. SPD1과 SPD2의 전압보호레벨이 동일한 경우 1.2/50 $\mu$ s 임펄스전압에 대한 각 SPD의 단자전압과 전류파형의 대표적인 예  
Fig. 6. Typical examples of the terminal voltage and current waveforms of each SPDs against 1.2/50 $\mu$ s impulse voltage when the voltage protection level of SPD1 and SPD2 is the same

그림 6의 전압파형에서 SPD1의 단자전압은 SPD2와 보호거리에 따른 전압강하의 합으로 나타나며, 전압보호레벨이 같기 때문에 Case 1의 경우보다 더 많은 전류가 SPD1으로 흐른다. 그러나 도통기간은 SPD2가 긴 것으로 나타났다. 보호거리를 파라미터로 하여 입사되는 서지전류의 크기에 따른 각 SPD의 단자전압의 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 보호거리의 증가에 따라 SPD1의 제한전압의 변동은 비교적 큰 반면, SPD2의 제한전압의 변동이 작게 나타나 보호효과가 양호한 것으로 볼 수 있다. 또한 보호거리의 증가에 따라 SPD1과 SPD2의 제한전압의 차이도 크게

나타났다.

상위와 하위의 SPD의 전압보호레벨이 동일할 경우 상위에 있는 SPD1이 먼저 동작을 하고 SPD1에 흐르는 전류의 증가에 따라 SPD1의 제한전압이 상승하여 SPD2가 동작하며, SPD2의 제한전압과 SPD2에 흐르는 전류에 의해 보호거리에 상응하는 인덕턴스에 의한 전압강하의 합이 SPD1의 단자전압으로 된다. 따라서 SPD2에 흐르는 전류는 SPD1에 흐르는 전류보다 훨씬 작으므로 SPD2의 단자전압이 SPD1의 단자전압보다 낮은 것으로 보호대상기기에 입사하는 전압이 낮아져 효과적인 보호가 이루어지는 것으로 판단된다.

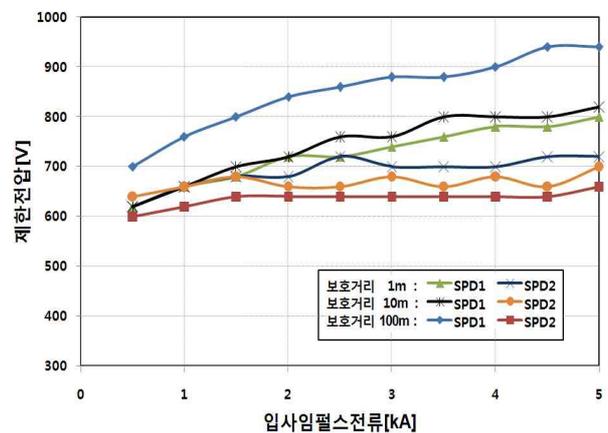


그림 7. Case 2에 대한 보호거리에 따른 각 SPD 단자전압의 측정값  
Fig. 7. Measured results of the residual voltage of each SPDs as a function of protective distance for Case 2

조합과 임펄스가 SPD1의 앞단에서 입사한 때 각 SPD 양단에 나타나는 단자전압과 SPD에 흐르는 전류의 측정결과를 기반으로 산출한 각 SPD가 분담하는 에너지를 그림 8에 나타내었다. 상위와 하위 SPD의 전압보호레벨이 동일한 조합의 경우 서지가 SPD1의 앞단에서 입사되면 SPD1이 대부분의 에너지를 분담하고, SPD2가 일부의 에너지를 분담하며, SPD2의 단자전압이 낮아 부하기기의 보호가 적절하게 이루어지는 것으로 판단된다. 또한 보호거리의 증가에 따라 SPD2의 에너지분담이 작아지므로 SPD를 선정할 때 보호거리에 따라 상위와 하위 SPD의 에너지내량을

고려하여 적절히 선정하는 것이 설계의 주안점이 되는 것으로 볼 수 있다.

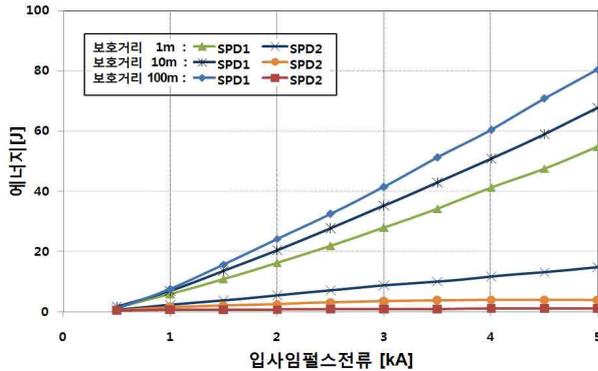


그림 8. Case 2에 대한 보호거리에 따라 각 SPD가 분담하는 에너지의 산출결과  
 Fig. 8. Calculated results of the sharing energy of each SPDs as a function of the protective distance for Case 2

### 4.3 상위 SPD의 전압보호레벨이 낮은 경우(Case 3)

상위 SPD로 SPD<sub>b</sub>를 그리고 하위 SPD로 SPD<sub>a</sub>를 중속 접속한 경우(Case 3) 조합과 임펄스가 입사한 때 각 SPD에 흐르는 임펄스전류와 단자전압 파형의 대표적인 예를 그림 9에 나타내었다.

SPD<sub>2</sub>의 전압보호레벨이 SPD<sub>1</sub>의 전압보호레벨보다 높기 때문에 SPD<sub>2</sub>가 동작을 하지 않을 경우 그림 8에서 보는 바와 SPD<sub>1</sub>에서 제한된 서지전압의 왕복 진동현상으로 SPD<sub>2</sub>의 단자전압이 높아지는 것으로 나타났다. 또한 거의 대부분의 전류가 SPD<sub>1</sub>에 흐르며, SPD<sub>1</sub>이 거의 모든 에너지를 분담하게 된다.

보호거리를 파라미터로 하여 입사한 서지전류의 크기에 따른 SPD<sub>1</sub>과 SPD<sub>2</sub>의 단자전압의 측정 결과를 그림 10에 나타내었다. 이때 SPD<sub>1</sub>과 SPD<sub>2</sub>의 전압보호레벨의 차이가 커서 입사한 서지전류가 작을 때는 SPD<sub>2</sub>가 동작을 하지 않으며, 그림 9의 전압파형에서 보듯이 SPD<sub>1</sub>에 의해 제한된 전압이 왕복진동현상에 의하여 상승된 전압이 SPD<sub>2</sub>의 제한전압보다 큰 경우 피크전압만을 제한하는 것으로 볼 수 있다.

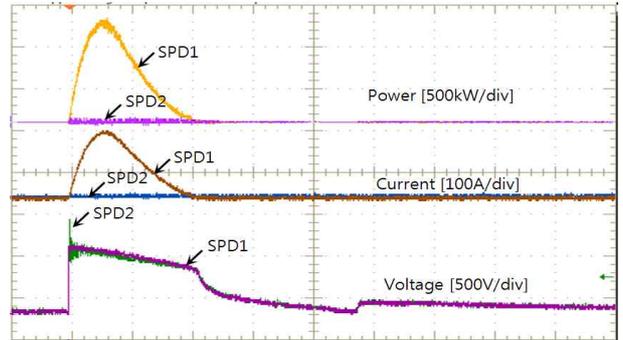


그림 9. SPD<sub>1</sub>의 전압보호레벨이 SPD<sub>2</sub>보다 낮은 경우 1.2/50µs 임펄스전압에 대한 각 SPD의 단자전압과 전류파형의 전형적인 예  
 Fig. 9. Typical examples of terminal voltage and current waveforms of each SPDs against 1.2/50µs impulse voltage when the voltage protection level of SPD<sub>1</sub> is lower than that of SPD<sub>2</sub>

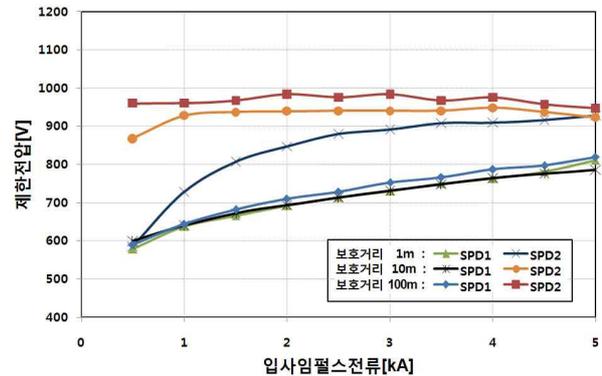


그림 10. Case 3에 대한 보호거리에 따른 각 SPD 단자전압의 측정값  
 Fig. 10. Measured results of the residual voltage of each SPDs as a function of protective distance for Case 3

조합과 임펄스를 SPD<sub>1</sub>의 앞단에서 입사하였을 때 각 SPD가 분담하는 에너지의 산출결과를 그림 11에 나타내었으며, 입사된 에너지의 대부분을 SPD<sub>1</sub>이 분담하는 것으로 볼 수 있다. 서지전류가 약 1.5kA이하 일 때는 SPD<sub>2</sub>는 동작하지 않아 에너지의 분담이 없는 것으로 나타났다. 따라서 상위 SPD의 전압보호레벨이 하위 SPD의 전압보호레벨보다 훨씬 낮게 선정할 조합의 중속 접속은 하위 SPD의 역할이 거의 없으므로 적절하지 못한 SPD의 선정으로 판명되었다.

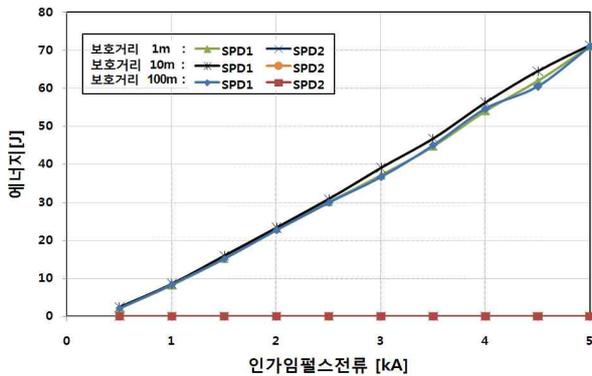


그림 11. Case 3에 대한 보호거리에 따른 각 SPD에 분담에너지의 산출결과  
 Fig. 11. Calculated results of the sharing energy of each SPDs as a function of the protective distance for Case 3

### 5. 결 론

뇌서지에 대한 전기전자시스템의 효과적인 보호를 위해 전압제한형 SPD를 종속 접속하는 경우 보호거리에 따른 SPD의 적절한 선정 및 보호효과에 대한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상위 SPD의 전압보호레벨이 하위 SPD의 전압보호레벨보다 높은 경우 보호대상기기에 입사되는 전압을 낮게 제한하는 효과는 얻을 수 있으나 보호거리가 긴 경우 하위 SPD의 분담에너지가 커져 적절하지 못한 조합으로 판명되었다.

(2) 상위와 하위 SPD의 전압보호레벨이 동일한 경우 각 SPD의 에너지분담이 적절하며 보호효과도 양호한 것으로 나타났다.

(3) 상위 SPD의 전압보호레벨이 하위 SPD의 전압보호레벨보다 낮은 경우 상위 SPD가 대부분의 에너지를 분담하며, 보호대상기기에 입사되는 제한전압도 비교적 높아 하위 SPD의 역할이 거의 없어 종속 접속의 효과가 매우 낮은 것으로 나타났다.

### References

[1] KS C IEC 62305-4; Protection against lightning - Part 4 : Electrical and electronic systems within structures, pp. 83~ 84, 2007.  
 [2] Korea Electric Association ; Korea Electro-technical Com-

mision Guidance - Technical Guide for selection and application of surge protective devices in low-voltage power systems, pp.10~12, 81, 2011.  
 [3] B. H. Lee, D. M. Lee, D. C. Cheong, S. B. Lee, and S. C. Lee, " Protection Effects According to the Conditions of Installations of SPDs for Information-Oriented Equipments", J. KIIEE, Vol.21, No.1, pp.35~41, 2007.  
 [4] ANSI/IEEE C62.41.1 Guide on the Surge Environment in low - voltage(1000V and less) AC Power Circuits pp.39~27, 2002.  
 [5] KS C IEC 61643-12; Low-voltage surge protective devices - Part 12 : Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems - Selection and Application principles, pp. 27~38, 2007.  
 [6] J. He, Z. Yuan, J. Xu, S. Chen, J. Zou, and R Zeng, "Evaluation of the effective protection distance of low-voltage SPD to equipment", IEEE Trans. Power Delivery., Vol. 20, No. 1, pp.123-130, 2005.

### ◇ 저자소개 ◇



**이복희 (李福熙)**

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 2010~2011년 본 학회 회장. 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



**신희경 (申惠璟)**

1973년 12월 11일생. 1999년 동국대학교 안전공학과 졸업. 2004년 한양대학 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 인하대학원 전기공학과 (박사과정). 현재 주식회사 엘피에스코리아 대표이사.

Tel : (02)2639-8872

Fax : (02)2639-8873

E-mail : hkshin@lpskorea.com